

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 004.9 681.3 07

Д.Г. Зеленцов, д-р техн. наук, проф.,  
Л.В. Новикова

Государственное высшее учебное заведение „Украинский  
государственный химико-технологический университет“,  
г. Днепропетровск, Украина, e-mail: dmyt\_zel@mail.ru;  
Novikova\_L\_V@ukr.net

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КОРРОДИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

D.G. Zelentsov, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
L.V. Novikova

State Higher Educational Institution “Ukrainian state university of  
chemical technology”, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail:  
dmyt\_zel@mail.ru, Novikova\_L\_V@ukr.net

## IMPROVEMENT OF THE EFFICIENCY OF NUMERICAL METHODS EMPLOYED IN CORROSIVE CONSTRUCTIONS RESEARCH

**Цель.** Создание нейросетевого алгоритма определения рациональных параметров численно-аналитических процедур решения систем дифференциальных уравнений, описывающих коррозионный процесс в многоэлементных стержневых конструкциях, с целью минимизации вычислительных затрат.

**Методика.** Для реализации поставленной цели предлагается новый алгоритм метода Эйлера с неравномерным шагом интегрирования (приращения по времени). Алгоритм предполагает задание равномерного приращения глубины коррозионного поражения как функции времени, а для определения приращения аргумента (времени) – использование аналитических формул. Для определения минимального количества узловых точек на интервале интегрирования, обеспечивающих требуемую точность решения, используются нейронные сети.

**Результаты.** Проведен анализ существующих подходов к решению данной проблемы и определены способы повышения их эффективности. Исследовано влияние параметров конструкции и агрессивной среды на точность решения систем дифференциальных уравнений, описывающих коррозионный процесс. С помощью искусственной нейронной сети формализована функциональная зависимость между этими параметрами и рациональным количеством шагов численно-аналитического алгоритма. Изложена методика получения обучающих выборок для различных типов сечений стержневых элементов. Приведены результаты численного эксперимента, которые подтверждают высокую эффективность предложенного подхода.

**Научная новизна.** Заключается в использовании нейросетевых моделей представления знаний в численно-аналитических алгоритмах решения систем дифференциальных уравнений.

**Практическая значимость.** Предложена и обоснована методика решения систем дифференциальных уравнений для моделирования поведения корродирующих многоэлементных конструкций. Её применение позволяет производить расчёт таких конструкций с заданной точностью при минимальных вычислительных затратах.

**Ключевые слова:** *корродирующие конструкции, системы дифференциальных уравнений, искусственные нейронные сети*

**Постановка проблемы.** Проблема прогнозирования состояния сложных процессов и систем различной природы является в настоящее время весьма актуальной [1, 2]. В последние десятилетия значительное внимание уделяется математическому моделированию процессов, связанных с воздействием различных агрессивных сред на прочностные характеристики конструкций. Широкое использование металлических конструк-

ций в различных отраслях промышленности обуславливает необходимость создания надёжных и эффективных методик, позволяющих моделировать их поведение в процессе эксплуатации [1, 3–5]. Контакт поверхности металла с жидкими или газообразными технологическими средами вызывает, как правило, коррозионный износ металла, то есть разрушение его приповерхностного слоя. Результатом коррозии является изменение начальных геометрических размеров конструктивных элементов, их напряжённо-деформированного

© Зеленцов Д.Г., Новикова Л.В., 2015

состояния, а иногда и характера нагружения. Всё это приводит к снижению несущей способности конструкции и её преждевременному, нередко аварийному, выходу из строя. Следует добавить, что механические напряжения приводят к ускорению процесса коррозионного износа.

Поведение конструкции может быть исследовано путём решения задачи Коши для систем дифференциальных уравнений (СДУ), описывающих процесс коррозии в её элементах. В связи с этим становится актуальной проблема создания новых надёжных и эффективных вычислительных алгоритмов решения таких систем, позволяющих проводить расчёты с заданной гарантированной точностью. Решение данной проблемы может быть достигнуто, по мнению авторов, с одной стороны, путём повышения эффективности численных алгоритмов решения СДУ, с другой – путём создания обоснованных методик и процедур определения параметров численных алгоритмов, которые обеспечивали бы достижение требуемой точности вычислений при минимальных вычислительных затратах. Вторая задача имеет самостоятельное значение и для её решения предлагается использование искусственных нейронных сетей.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Проблема повышения эффективности численных методов решения СДУ, описывающих коррозионные процессы в шарнирно-стержневых системах (ШСС), нашла отражение, в том числе, в работе [3]. В ней было предложено использовать аналитические формулы, позволяющие определить долговечность корродирующих стержневых элементов при постоянном значении осевого усилия. В дальнейшем, в [4, 6] были предложены и обоснованы эффективные численно-аналитические алгоритмы решения СДУ. В них предлагалось использовать равномерный шаг по некоторой функции аргумента  $t$ , а соответствующее значение  $\Delta t$  определять по аналитическим формулам. Точность численно-аналитического алгоритма зависела от количества узловых точек на интервале изменения функции. Однако, конкретных рекомендаций, позволяющих определить количество узловых точек в зависимости от требуемой точности решения, в этих работах получено не было.

В работе [7] был предложен новый алгоритм определения параметра численного решения СДУ, использующий искусственную нейронную сеть (ИНС). Для решения СДУ был использован традиционный численный алгоритм метода Эйлера с постоянным шагом интегрирования  $\Delta t$ . Определение рационального параметра численного алгоритма осуществлялось применительно к расчёту корродирующих ШСС.

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.** В работах [3, 4, 7] в качестве объектов исследования рассматривались абстрактные ШСС со стержнями кольцевого сечения. Рекомендации, приведенные в них, имели более теоретическое, чем практическое значение. Авторами будут рассмотрены конструкции, изготовленные из стержней стандартных профилей (двутавр, швеллер, уголок). Для таких конструкций

полученные ранее рекомендации, в большинстве случаев, оказываются неприемлемыми. Это объясняется следующими свойствами стандартных профилей:

- коэффициент слитности сечения (отношение периметра к площади) значительно выше, чем у стержней кольцевого сечения с той же площадью, что приводит к увеличению скорости роста напряжений;
- размеры сечений стандартных профилей предполагают возможность разрушения элемента вследствие нарушения ограничения на сплошность сечения;
- вычисление минимального момента инерции для стержней, работающих на сжатие, представляет собой достаточно громоздкую процедуру ввиду возможного изменения положения главных осей сечения.

**Формулирование целей статьи.** В настоящей статье предлагается описание нейросетевого алгоритма выбора рациональных параметров численного решения СДУ, то есть таких значений, при которых решение может быть получено с заданной точностью с минимальными вычислительными затратами. В качестве объекта исследования рассматриваются ШСС, элементы которых изготовлены из стандартных профилей. Главное внимание уделяется случаю, когда активным ограничением, определяющим долговечность конструкции, является ограничение по устойчивости какого-либо её элемента. Так как значение момента инерции сечения во многом определяется его формой, то решение поставленной задачи предполагает обучение ИНС для различных типов сечений и получение соответствующих матриц весовых коэффициентов.

**Изложение основного материала.** Для описания процесса коррозии будем использовать математическую модель следующего вида [1]

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0(1 + k\sigma) \quad , \quad (1)$$

где  $\delta$  – глубина коррозионного поражения;  $t$  – время;  $v_0$  – скорость коррозии при отсутствии напряжения;  $\sigma$  – абсолютная величина напряжения.

На изменение напряжения в  $i$ -м элементе конструкции оказывают влияние два фактора: уменьшение площади сечения этого элемента  $A_i$  и изменение осевого усилия  $Q_i$ , которое для статически неопределимых конструкций зависит от жесткостных характеристик всех  $N$  элементов  $Q_i = Q_i(\bar{\delta})$ . С учётом этого СДУ, описывающая коррозионный процесс в элементах конструкции, имеет вид

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0[1 + k\sigma_i(A_i(\delta_i), Q_i(\bar{\delta}))];$$

$$\delta_i \Big|_{t=0} = 0; \quad i = 1, N. \quad (2)$$

Функция напряжений задаётся в виде вычислительного алгоритма, как правило – метода конечных элементов [3, 4]. Следовательно, решение СДУ (2) также возможно только численно, например, методом Эйлера

$$\delta_i^s = \delta_i^{s-1} + \Delta t^s v_0 \times [1 + k\sigma_i^{s-1} (A_i^{s-1} (\delta_i^{s-1}), Q_i^{s-1} (\delta_i^{s-1}))], \quad (3)$$

где  $\Delta t^s$  – длина  $s$ -го шага интегрирования СДУ.

Целью решения СДУ (2) в задачах расчёта долговечности является определение значений  $t_i$ , соответствующих моментам исчерпания несущей способности стержневых элементов конструкции, которые определяются ограничениями по прочности, устойчивости и сплошности сечения. Очевидно, долговечность конструкции в целом определится как  $t = \min\{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ .

Пусть  $t_{et}$  и  $t_{nm}$  – точное (эталонное) и численное решения (2), причём численное решение и его погрешность зависят от количества узлов на интервале

$$t_{nm} = t_{nm}(n); \quad \varepsilon = \frac{|t_{et} - t_{nm}(n)|}{t_{et}}. \quad \text{Точность решения}$$

задачи долговечности будет определяться количеством узловых точек при численном решении СДУ.

Таким образом, на начальном этапе требуется определить минимальное количество узловых точек  $n$ , при котором погрешность решения задачи долговечности для конструкции с заданными геометрическими характеристиками, условиями нагружения и известными параметрами агрессивной среды не превышала бы некоторого предельно допустимого значения  $[\varepsilon]$

$$\frac{|t_{et} - t_{nm}(n, \bar{c})|}{t_{et}} \leq [\varepsilon]. \quad (4)$$

Здесь  $\bar{c}$  – вектор параметров, влияющих, помимо количества узловых точек, на значение численного решения. К таким параметрам относятся площадь и периметр сечения стержневого элемента, начальные и предельные значения напряжений в нём, параметры агрессивной среды.

В данной работе для решения СДУ предлагается применить численно-аналитический алгоритм метода Эйлера с неравномерным шагом  $\Delta t$ . Он основан на использовании равномерного приращения глубины коррозии  $\Delta\delta$  в качестве параметра интегрирования с последующим пересчётом приращения по времени. Для этого используется аналитическая формула, позволяющая определить время, за которое в стержневом элементе конструкции происходит увеличение глубины коррозии на величину  $\Delta\delta$

$$\Delta t^s = \tau - \frac{2kQ^{s-1}}{v_0 \cdot |d|} \times \left\{ \arctg \frac{2a \cdot \Delta\delta - P^{s-1}}{|d|} + \arctg \frac{P^{s-1}}{|d|} \right\}. \quad (5)$$

Здесь  $A^{s-1}$ ,  $P^{s-1}$  и  $Q^{s-1}$  – площадь, периметр сечения и величина осевого усилия на  $s$ -й итерации;  $\tau = \frac{\Delta\delta}{v_0}$ ;  $a$  – коэффициент формы сечения;

$$c = A^{s-1} + kQ^{s-1}; \quad d = \sqrt{(P^{s-1})^2 - 4ac}; \quad d \neq 0.$$

Для определения рациональных параметров решения СДУ с использованием вышеописанного численно-аналитического алгоритма предлагается использовать нейронные сети с целочисленными функциями активации для выходного элемента.

Как отмечалось выше, выход из строя отдельного элемента конструкции может определяться ограничениями по прочности, сплошности сечения и устойчивости. В первых двух случаях на точность решения СДУ будут оказывать влияние площадь и периметр сечения, величина начального напряжения  $\sigma_0$  и скорость коррозии  $v_0$ . В последнем случае важными факторами являются также минимальный момент инерции сечения и длина элемента, которая определяет величину критического напряжения потери устойчивости  $\sigma_0^*$ . С учётом вышесказанного, для решения поставленной задачи использовались ИНС с разным количеством входных и скрытых элементов (рис. 1). На рис.1 приняты следующие обозначения:  $N$  – нормализованное значение типоразмера профиля;  $\sigma_0$  – величина начального напряжения;  $\sigma_0^*$  – величина критического напряжения;  $v_0$  – скорость коррозии;  $n$  – количество узловых точек на интервале.

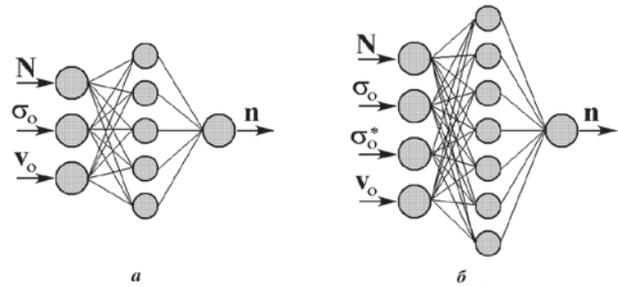


Рис. 1. Архитектура ИНС для растянутых (а) и сжатых (б) элементов

В качестве функции активации скрытого слоя использовалась сигмоидальная функция вида

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-c \cdot x)}. \quad (6)$$

Для выходного элемента принималась кусочно-непрерывная функция

$$f(x) = \text{int} \left\{ \frac{k}{1 + \exp(-c \cdot x)} \right\} + 1. \quad (7)$$

Необходимое число образцов  $N$  для обучения сети определялось на основании рекомендаций, приведенных в [8, 9].

Использование формулы вида (7) исключает возможность применения алгоритма обратного распространения ошибки для обучения сети. Поэтому в работе для этой цели был применён вещественный генетический алгоритм [10]. Применительно к данной задаче, генетический алгоритм использовался для минимизации (по коэффициентам матриц весов) функции средней ошибки сети.

Так как размеры сечений регламентируются стандартами, то в качестве входного параметра ИНС принимается нормализованное значение типоразмера профиля, а их конкретные значения определяются как элементы строк, соответствующих каждому профилю матриц. Для каждого из типов сечений (двутавр, швеллер, уголок) момент инерции определяется с использованием различных формул и моделей корродирующих сечений, приведенных в [4]. Результатом обучения ИНС является набор матриц весовых коэффициентов, полученных для разных типов профилей и обеспечивающих разную точность решения СДУ.

На изменение напряжения в  $i$ -м элементе оказывают влияние два фактора: изменение геометрических характеристик и изменение величины внутренних усилий. Как показано в [3], влияние первого фактора значительно превосходит влияние второго. Таким образом, если известно количество интервалов  $n$ , обеспечивающих необходимую точность численно-аналитического алгоритма при постоянных значениях усилий, то и при изменяющихся усилиях данная точность будет обеспечена. Поэтому аналитическая формула (5) может быть использована для обучения ИС.

Рассмотрим алгоритм получения учебного образца для случая стержня двутаврового сечения при активных ограничениях по устойчивости.

На начальном этапе случайным образом определяются входные параметры ИНС.

Величина значения глубины коррозии, при которой стержень теряет устойчивость, определяется путём решения нелинейного уравнения вида

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_0^* \cdot I(\delta)}{I_0} .$$

Здесь  $I(\delta)$  – минимальный момент инерции прокорродировавшего сечения, определяемый по формуле

$$I(\delta) = \frac{1}{12} \left[ 2(T-2\delta)(B-2\delta)^3 + (H-2T+2\delta)(D-2\delta)^3 \right] ,$$

где  $I_0$  – начальное значение момента инерции (при  $\delta = 0$ );  $B, H, D, T$  – размеры сечения, определяемые входным параметром  $N$ .

Эталонное значение долговечности стержня  $t_{et}$  находится по формуле (5). Приближённое значение долго-

вечности  $t_{nm}$  вычисляется в соответствии с описанным выше алгоритмом. Минимальное количество узловых точек, обеспечивающее заданную точность, определяется из неравенства (4). Полученные результаты заносятся в массив обучающих образцов.

Для иллюстрации возможностей нейросетевого алгоритма определения рациональных параметров численно-аналитических процедур решения систем дифференциальных уравнений была решена задача определения долговечности 5-стержневой статически неопределимой ШСС, представленной на рис. 2.

Параметры фермы и агрессивной среды полагались известными:  $L = 200$  см;  $E = 2,1 \times 10^5$  МПа;  $[\sigma] = 240$  МПа;

$\nu_0 = 0,1$  см/год;  $k = 0,003$  МПа<sup>-1</sup>. Величина внешней нагрузки  $P = 200$  кН. Сечения элементов: (1) – двутавр № 6; (2) – швеллер № (4); (3) и (5) – равнополочные уголки № 3 и № 7 соответственно; (4) – неравнополочный уголок № 6 (ГОСТ 8239-89, 8240-97, 8509-93, 8510-93). Предельное состояние конструкции определялось условием исчерпания несущей способности (ограничением по устойчивости) элемента (2). Количество итераций решения СДУ, полученное с помощью нейронной сети для данной конструкции при предельно допустимой погрешности  $[\varepsilon] = 0,01$ , равнялось тринадцати. На рис. 2 приняты следующие обозначения:  $L$  – длина стержня;  $P$  – величина внешней нагрузки.

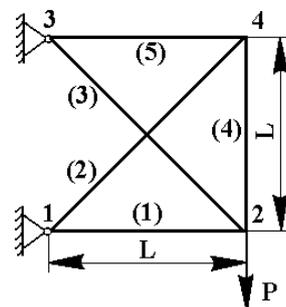


Рис. 2. Расчетная схема ШСС

Некоторые результаты решения задачи представлены в табл. 1. Здесь для каждой итерации приведены значения глубины коррозионного поражения в элементе фермы (2), соответствующее значение времени, приращение времени, соответствующее постоянному приращению  $\Delta\delta = 0,1138$  мм, и значения текущего и критического напряжений.

Эталонное решение было получено с использованием метода Эйлера при  $\Delta t = 0,005$  года (225 итераций) и составило  $t_{et} = 1,123$  года. Реальная погрешность решения – 0,008. Для сравнения в табл. 2 приведены результаты решения задачи долговечности, полученные методом Эйлера с постоянным шагом интегрирования.

**Выводы и перспективы развития направления.** Приведенные результаты численного эксперимента подтверждают высокую эффективность предложенного численно-аналитического метода решения СДУ, описывающих коррозионный процесс, и нейросетевого алгоритма определения его параметров. Предложенный

подход к моделированию коррозионных процессов, в отличие от известных, позволяет получать решения с заданной точностью. Разработанные процедуры могут использоваться при создании информационных систем для расчётов корродирующих конструкций.

Таблиця 1

Результаты решения задачи

n	$\delta$ , мм	$\Delta t$ , лет	$t$ , лет	$\sigma$ , МПа	$\sigma^*$ , МПа
0	-	-	-	73,74	123,02
1	0,1138	0,093	0,093	76,03	122,66
2	0,2277	0,092	0,185	78,47	122,31
3	0,3415	0,092	0,277	81,07	121,96
4	0,4554	0,091	0,368	83,84	121,62
5	0,5692	0,091	0,459	86,80	121,29
6	0,6831	0,090	0,549	89,97	120,96
7	0,7969	0,089	0,638	93,38	120,63
8	0,9108	0,089	0,727	97,04	120,31
9	1,0246	0,088	0,815	100,99	120,00
10	1,1385	0,087	0,902	105,26	119,70
11	1,2523	0,086	0,988	109,90	119,40
12	1,3662	0,085	1,073	114,96	119,11
13	1,4800	0,059	1,132	118,49	118,63

Таблиця 2

Количественные характеристики точности и эффективности

$\Delta t$ , лет	$t$ , лет	$\epsilon$	Количество шагов
0,050	1,181	0,0514	23
0,025	1,154	0,0273	45
0,010	1,133	0,0085	113

**Список литературы / References**

1. Овчинников И.Г. Тонкостенные конструкции в условиях коррозионного износа. Расчёт и оптимизация / Овчинников И.Г., Почтман Ю.М. – Днепропетровск: ДГУ, 1995 – 192 с.  
 Ovchinnikov, I.G. and Pochtman, Yu.M. (1995), *Tonkostennyye konstruktsyyi v usloviyakh korrozionnogo iznosa. Raschet i optimizatsyya* [Thin-Walled Structures under Corrosive Wear. Calculation and Optimization], DNU, Dnepropetrovsk, Ukraine.  
 2. Корниенко В.И. Комплексная оценка, идентификация и прогнозирование сложных нелинейных процессов / В.И.Корниенко, И.Г. Гулина, Л.В. Будкова // Науковий вісник НГУ. – 2013. – № 6 (138). – С. 124–131.  
 Kornienko, V.I., Gulina, I.G. and Budkova, L.V. (2013), "Complex estimation, identification and prediction of difficult nonlinear processes", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 6 (138), pp. 124–131.

3. Зеленцов Д.Г. Расчет конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы: монография / Зеленцов Д.Г. – Днепропетровск: УГХТУ, 2002. – 168 с.

Zelentsov, D.G. (2002), *Raschet konstruktsyyi s izmenyayushcheysoy geometriyey v agressivnykh sredakh* [Calculation of Structures with Variable Geometry in Aggressive Environments. Rod Systems], Monograph, UDHTU, Dnepropetrovsk, Ukraine.

4. Зеленцов Д.Г. Информационное обеспечение расчётов корродирующих объектов. Математические модели и концепция проектирования систем / Зеленцов Д.Г., Ляшенко О.А., Науменко Н.Ю. – Днепропетровск: УГХТУ, 2012. – 264 с.

Zelentsov, D.G., Lyashenko, O.A. and Naumenko, N.Yu. (2012), *Informatsyonnoye obespecheniye raschetov korrodiryushchikh obyektov* [Dataware Calculations Corrosive Objects. Mathematical Models and the Concept of System Design], UDHTU, Dnepropetrovsk, Ukraine.

5. Иванова А.П. Исследование долговечности центрально сжатых стержней с изменяющимися геометрическими характеристиками / А.П. Иванова // Науковий вісник НГУ. – 2013. – №3(135). – С.87–92

Ivanova, A.P. "Research of durability of the centrally compressed bars with changing geometrical", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2013), Vol. 3 (135), pp .87–92.

6. Науменко Н.Ю. Математичні моделі процесу корозії в задачах будівельної механіки кородуючих конструкцій / Н.Ю.Науменко, О.А.Ляшенко // Вопросы химии и химической технологии. – 2010. – № 6. – С. 144–147.

Naumenko, N.Yu. and Lyashenko, O.A. (2010), "Mathematical models of corrosion process in the tasks of structural mechanics of corrosive constructions", *Voprosy Khimii i Khimicheskoy Tekhnologii*, no. 6, pp. 144–147.

7. Короткая Л.И. Численное решение некоторых классов систем дифференциальных уравнений с использованием нейронных сетей: тезисы докл. XIX международной научно-технической конференции (12–16 сентября 2011г.) / Л.И. Короткая // Прикладные задачи математики и механики. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – С. 226–228.

Korotkaya, L.I. (2011), "Numeral root-finding in some classes of differential equation systems using neural networks", *Proc. of the 19th Int. Scientific and Technical Conference "Applied Tasks Of Mathematics And Mechanics"*, September 12-16, 2011, SEVNTU, Sevastopol, pp. 226–228.

8. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / Барский А.Б. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с.

Barskiy, A.B. (2004), [Neural Networks: Recognition, Management, Decision Making], *Finansy i statistika*, Moscow, Russia.

9. Калан Р. Основные концепции нейронных сетей / Роберт Калан; пер с англ. А.Г. Сивак. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 287 с.

Kalan, R. (2001), *Osnovnye kontseptsyyi neyronnykh setey* [Basic Concept of Neural Networks], Translated from English by A.G. Sivak, Publishing House "Williams", Moscow, Russia.

10. Емельянов В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / Емельянов В. В., Курейчик В. М., Курейчик В. В. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.

Emelyanov, V.V., Kureychik, V.M. and Kureychik, V.V. (2003), *Teoriya i praktika evolyutsyonnogo modelirovaniya* [Theory and Practice of Evolutional Modelling], FIZMATLIT, Moscow, Russia.

**Мета.** Створення нейромережевого алгоритму визначення раціональних параметрів чисельно-аналітичних процедур розв'язання систем диференціальних рівнянь, що описують корозійний процес у багатоелементних стрижневих конструкціях, з метою мінімізації обчислювальних витрат.

**Методика.** Для реалізації поставленої мети пропонується новий алгоритм методу Ейлера з нерівномірним кроком інтегрування (приріст за часом). Алгоритм припускає завдання рівномірного приросту глибини корозійної поразки як функції часу, а для визначення приросту аргументу (часу) – використання аналітичних формул. Для визначення мінімальної кількості вузлових точок на інтервалі інтегрування, що забезпечують необхідну точність розв'язку, використовуються нейронні мережі.

**Результати.** Проведено аналіз існуючих підходів до вирішення даної проблеми та визначені способи підвищення їх ефективності. Досліджено вплив параметрів конструкції та агресивного середовища на точність розв'язку систем диференціальних рівнянь, що описують корозійний процес. За допомогою штучної нейронної мережі формалізована функціональна залежність між цими параметрами та раціональною кількістю вузлових точок на інтервалі інтегрування, що забезпечують необхідну точність розв'язку. Викладена методика отримання навчальних вибірок для різних типів перерізів стрижневих елементів. Приведені результати чисельного експерименту, що підтверджують високу ефективність запропонованого підходу.

**Наукова новизна.** Полягає у використанні нейромережевих моделей представлення знань у чисельно-аналітичних алгоритмах розв'язання систем диференціальних рівнянь.

**Практична значимість.** Запропонована й обґрунтована методика розв'язання систем диференціальних рівнянь для моделювання поведінки кородуючих багатоелементних конструкцій. Її застосування дозволяє

проводити розрахунок таких конструкцій із заданою точністю за мінімальних обчислювальних витратах.

**Ключові слова:** *кородуючі конструкції, системи диференціальних рівнянь, штучні нейронні мережі*

**Purpose.** Creation of a neural network algorithm for determination of rational parameters for numeral analytical procedures for solving systems of differential equations that describe the corrosion process in multi-elemental rod-shaped constructions, in order to minimize the computational cost.

**Methodology.** To achieve this goal a new algorithm for the Euler method with irregular integration step (increment in time) was proposed. The algorithm assumes setting uniform increment of corrosion damage depth as a function of time, and using analytical formulas to determine the increment of the argument (time). The neural networks were employed to determine the minimum number of node points on integration interval that ensures the required accuracy of the solution.

**Findings.** The analysis of existing approaches to this problem was made and the ways to improve their effectiveness were identified. The influence of constructions parameters and corrosive environment on the accuracy of solution of differential equation systems which describe the corrosion process was investigated. Artificial neural network was used to formalize functional relationship between these parameters and the rational number of node points on integration interval that ensures the required accuracy of the solution. The technique of obtaining the training samples for various types of rod element cross-sections was described. The results of numerical experiments that confirm the high efficiency of the proposed approach were shown.

**Originality.** Use of neural network models of knowledge representation in numerical and analytical algorithms for solving systems of differential equations.

**Practical value.** The technique for solving systems of differential equations for modeling the behavior of multi-elemental constructions was proposed and justified. Its use allows the calculation of such structures with a specified accuracy at minimal computational cost.

**Keywords:** *corrosive structures, systems of differential equations, artificial neural network*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.О. Бараненком. Дата надходження рукопису 28.03.14.*